

Werkstoffbewertung und Konstruktionsanforderungen

Sachs, Georg

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 9, 1957, S.36-47



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Festvortrag anlässlich der Gauß-Gedenkfeier
in Braunschweig am 30. April 1957

Werkstoffbewertung und Konstruktionsanforderungen

Von G. Sachs

Syracuse, Staat New York, USA

Mit 18 Abbildungen

Summary: The design of a construction in a new material is a very difficult task, because of the complexities of design requirements, on the one hand, and the peculiar properties of most high strength materials, on the other hand. It is now practically impossible to integrate the three different types of endeavor which lead to a successful design, namely the experimental procurement of design data and laws, their mathematical evaluation, and the utilization of these efforts by the designer. Therefore, a great need exists for specific experimentation aimed at establishing the material behavior under conditions incorporating one or several service variables. Examples of such work, combining service and laboratory tests, are described, which relate to different design efforts, namely: The simulation of service conditions for super-high strength steels by means of the notch tension test; the surface rolling of steel and magnesium and the specific conditions to be maintained, hereby, in order to arrive at maximum strength. The calculation of the service life of turbine buckets, based on stress rupture tests. Modell tests with lead and other low melting metals to arrive at the load-carrying capacity, as well as at forging conditions, for high melting metals.

Die Entwicklung neuer und verbesserter Werkstoffe hat in den letzten Jahrzehnten zahlreiche neue Probleme, sowohl für den Werkstoffingenieur, als auch für den Konstrukteur, geschaffen. Der erfolgreiche Entwurf von Maschinen und Konstruktionselementen verlangt eine Kombination von Intuition und wissenschaftlicher Kenntnis. Auf allen Gebieten, wo die wissenschaftlichen Erkenntnisse unzureichend und die Betriebsbeanspruchungen komplex sind, ist der Konstrukteur hauptsächlich auf seine Vorstellungskraft und auf Betriebserfahrungen angewiesen, falls er die Aufgabe, einen Entwurf zu verbessern und zu vervollkommen, erfolgreich lösen will. Großversuche an einzelnen und zusammengesetzten Bauelementen helfen ihm üblicherweise, die endgültige Entscheidung zu treffen und außerdem seinen Erfahrungsschatz zu bereichern.

Die Entwicklung von Flugzeugen für extrem hohe Geschwindigkeiten ist ein ausgeprägtes Beispiel für diese Prinzipien. Die Betriebsbeanspruchungen sind hier außerordentlich hoch und komplex. Der Bedarf an wissenschaftlichen Erkenntnissen und an kennzeichnenden Werkstoffwerten geht wesentlich über das Angebot hinaus. Das Sammeln von ausreichenden Betriebserfahrungen ist wegen des schnellen Alterns der Konstruktionen unmöglich. Infolgedessen wird auf diesem und anderen Gebieten die Lücke zwischen Theorie und Praxis keineswegs allmählich kleiner, sondern ständig größer.

Der Entwicklungsvorgang eines neuartigen Maschinenentwurfs stellt ein Zusammenwirken von drei grundsätzlich verschiedenen, wissenschaftlich-tech-

nischen Anstrengungen dar. Die erste ist die wissenschaftliche Erkenntnis, Sammlung und Ordnung grundlegender Tatsachen. Dies ist die Aufgabe von Experimentalforschern, deren Leitmotiv entweder das Streben nach Einsicht in Naturgesetze oder auch nur ein Auftrag zur Beschaffung von Kennziffern ist. Als zweites folgt dann der deduktive Prozeß des Voraussagens von Zusammenhängen durch Mathematiker, deren Werkzeug die starren Gesetze reiner Logik sind. Als drittes müssen dann diese experimentellen und mathematischen Kenntnisse praktisch ausgewertet werden, unter Verwendung von Interpolation, Extrapolation und Spekulation, soweit das letztere notwendig ist. Diese Aufgabe fällt den Konstruktionsingenieuren zu, deren Ziel der Bau einer bestimmten Maschine ist.

Die Methodik dieser drei Arbeitsgebiete ist gänzlich verschieden.

Um grundlegende Versuche erfolgreich auszuführen, ist es zunächst notwendig die maßgebenden Faktoren zu erkennen und sie dann experimentell soweit als möglich zu isolieren. Nur mit Hilfe solcher Versuche ist es möglich, Gesetze von allgemeiner Bedeutung zu entwickeln.

Die mathematische Behandlung von praktischen Problemen benutzt anderseits Modelle, welche die Bedingungen wesentlich vereinfachen; außerdem müssen gewisse Annahmen gemacht werden, damit die analytische Behandlung möglich wird.

Das Entwerfen der Maschine verlangt dagegen Berücksichtigung aller Faktoren und aller Beanspruchungselemente, während mathematische Exaktheit und Universalität von geringerer Bedeutung sind.

Solange nun die Gestalt und die Beanspruchung einer Maschine verhältnismäßig einfach sind, ist es möglich, die drei Tätigkeiten zu einer kontinuierlichen Kette zusammenzuschalten, so daß die Maschine mit einem Mindestmaß von Groß- und Betriebsversuchen erfolgreich entwickelt werden kann. Auf vielen Gebieten ist dies jedoch noch nicht möglich oder wieder unmöglich geworden.

Die Eigenschaften neuentwickelter Werkstoffe sind äußerst verwickelt, und für ihre Verarbeitung und ihre Verwendung gilt das gleiche. Infolgedessen bestehen weite Lücken zwischen den vorhandenen Daten, ihrer mathematischen Auswertung, und dem Bedarf des Konstruktionsingenieurs. Die gegenwärtige Entwicklung in dieser Beziehung und die grundsätzlich verschiedene Denkweise des Werkstoffachmanns, des Mathematikers und des Konstrukteurs lassen es zweifelhaft erscheinen, ob eine Kontinuität jemals wiederhergestellt werden kann. Es ist unmöglich, dieses Problem durch erhöhte Anstrengungen in jeder der einzelnen Disziplinen zu lösen: insbesondere kann der Konstrukteur sich in Zukunft nicht mehr darauf verlassen, daß Physiker, Chemiker und Metallurgen in der Lage sind, ihn mit den benötigten grundlegenden Gesetzen und Daten zu versorgen.

Das einzige, möglich erscheinende Heilmittel, welches diese gefährliche Sachlage verbessern kann, ist eine enge Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen. Es besteht daher meines Erachtens ein großer Bedarf an experimentellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, welche über die Grenzen der konventionellen wissenschaftlichen und technischen Disziplinen hinausgehen.

Solche Untersuchungen, die notwendigerweise einen erheblichen Umfang haben, würden auch eine Lösung für das mit dem obigen engverbundene

Problem darstellen, daß es zur Zeit an einer Verständigung zwischen Ingenieuren verschiedener Arbeitsrichtungen mangelt. Werkstoffforscher, Mathematiker und Betriebsingenieure sprechen heute verschiedene Sprachen, die nur ihre engeren Kollegen verstehen. Ingenieure, welche alle diese Sprachen einigermaßen beherrschen, sind am Aussterben, jedenfalls in den Vereinigten Staaten von Amerika.

In diesem Vortrag beabsichtige ich nun, die Ergebnisse einiger Untersuchungen zu besprechen, die einen Übergang von reinen Laboratoriumsversuchen zu simulierten Betriebsversuchen darzustellen. Solche Versuche unterscheiden sich von der üblichen Werkstoffprüfung darin, daß sie besonders dahin zielen, mehrere wichtige Elemente der Betriebsbeanspruchung zu erfassen und numerische Ergebnisse zu liefern, welche für den Konstrukteur von unmittelbarem Nutzen sind. Dies ist an sich nichts grundsätzlich Neues, u. a. hat früher der kürzlich verstorbene Herr Prof. *Thum* in Darmstadt den großen Nutzen dieser Forschungsmethode auf dem Gebiete der Werkstoffermüdung bewiesen. Jedoch ist diese Arbeitsrichtung wegen dringender kurzfristiger Probleme etwas in den Hintergrund getreten.

Grenzen für die Verwendung neuer Werkstoffe und ihre Bestimmung im Laboratorium

Hochentwickelte Konstruktionswerkstoffe sind in der Regel mit grundsätzlichen, fast pathologischen Empfindlichkeiten behaftet. Konstruktionsregeln, welche für weniger feste Materialien völlig ausreichen, führen bei diesen Werkstoffen oft zum frühzeitigen Versagen wegen spröder Brüche. Vorteile bietet daher ihre Verwendung nur innerhalb gewisser Bereiche geometrischer, metallurgischer, verarbeitungstechnischer und verwendungsbedingter Veränderlicher. Es ist also notwendig, die genauen Grenzen solcher Bereiche experimentell festzulegen und die üblichen Festigkeitsnormen durch solche einschränkenden Bedingungen zu ergänzen.

Eine derartige Werkstoffgruppe bilden die hochfesten, legierten und vergüteten Stähle, die sich seit etwa 1950 in Amerika als Flugzeugkonstruktionsstähle durchgesetzt haben [1]. Diese Stähle sind bis zu Festigkeiten von ungefähr 200 kg/mm² vergütet, während früher die zulässige Höchstfestigkeit solcher Stähle nur 140 kg/mm² war.

Es ist heute klar, daß die verhältnismäßig niedrige zulässige Festigkeit in der Vergangenheit mit der hochgradigen Empfindlichkeit solcher Stähle gegen Spannungskonzentration und auch mit ihrer Wasserstoffsprödigkeit zusammenhängt [2]. Systematische Laboratoriumsversuche [3], [4] haben zunächst gezeigt, daß die Festigkeit der Stähle durch Einkerbungen im Verhältnis zu der dadurch erzeugten Spannungserhöhung verringert wird, falls der Stahl eine gewisse Festigkeit überschreitet. Das Ausmaß dieser Kerbempfindlichkeit hängt von zahlreichen weiteren Faktoren ab, insbesondere von der Zusammensetzung des Stahles, der Querschnittsgröße des Teiles, und seiner Anisotropie oder „Faser“. Abb. 1 veranschaulicht diese Kerbempfindlichkeit eines geschmiedeten Verbindungsstückes von einem Flugzeugfahrgestell aus Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl (4340). Falls der Abrundungsradius

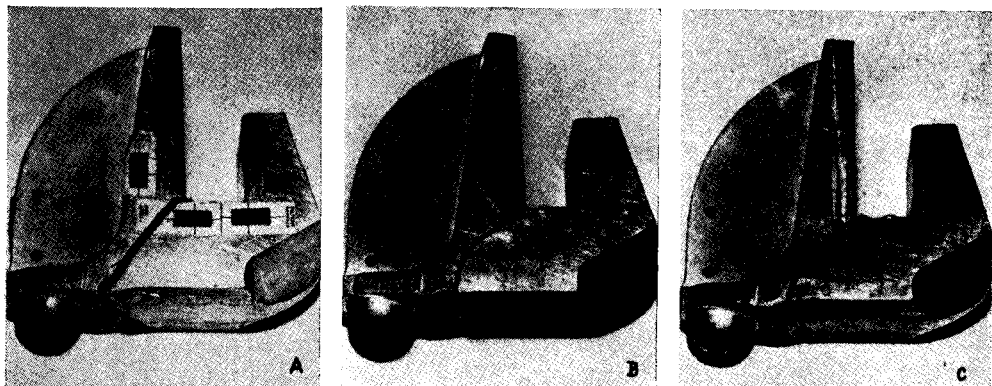


Abb. 1. Im Versuch gebrochene Ni-Cr-Mo-Stahl-Schmiedestücke

Schmiedestück aus Ni-Cr-Mo (4340) Stahl	A	B	C
Kehlradius (mm)	2,3	4,8	9,5
Kerbziffer	3,50	2,76	2,10
Verhältnis der gemessenen zur berechneten Festigkeit ..	0,70	0,81	0,87

an der Innenseite des Winkels sehr klein gehalten wird, ist die Festigkeit des Schmiedeteiles fast nur die Hälfte der erwarteten Festigkeit [5]. Eine Vergrößerung des Radius erhöht die Festigkeit entsprechend Abb. 2, bis sie schließlich die nach üblichen Regeln berechnete erreicht.

Der Nachweis dieser Kerbempfindlichkeit ist an sich im Laboratorium möglich, jedoch nur mit Hilfe von Versuchen, welche die hauptsächlichen Betriebsfaktoren berücksichtigen. Abb. 2 zeigt für den vorliegenden Fall, daß

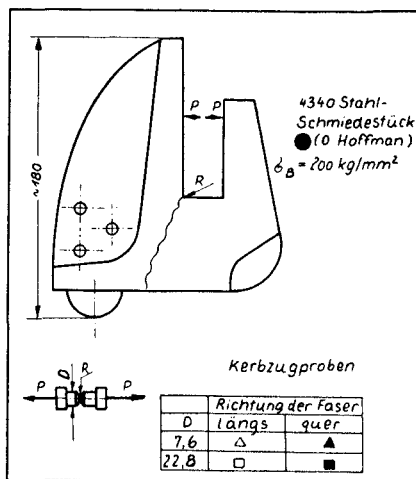
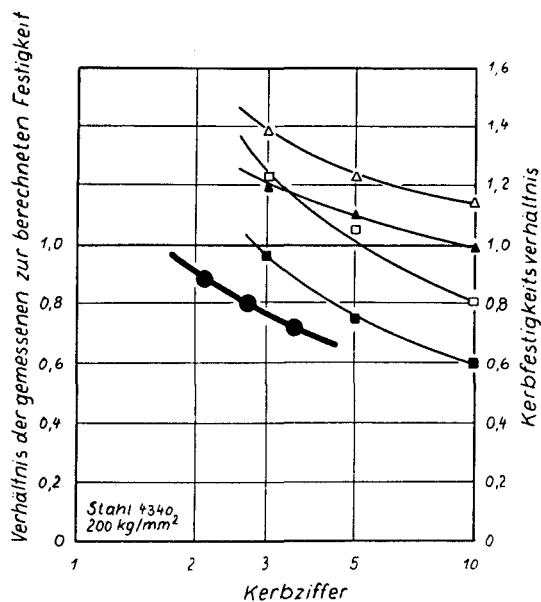


Abb. 2. Vergleich der Festigkeiten von Ni-Cr-Mo(4340)-Stahl-Schmiedestücken mit verschiedenen Kehlabrundungen und von verschieden gekerbten Zugproben

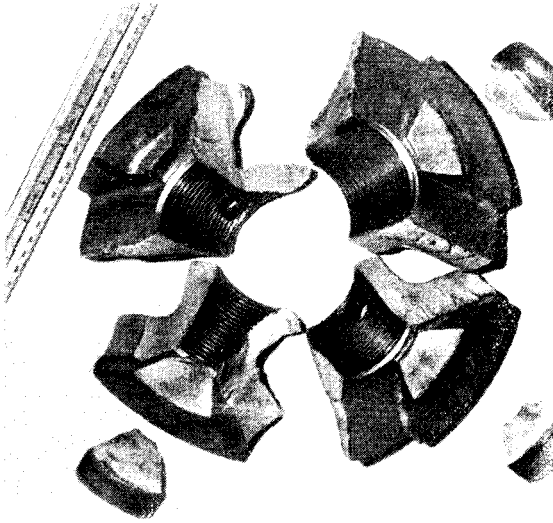


Abb. 3. Im Versuch gebrochene Ausgleichsmutter eines Flugzeug-Fahrgestells

eine der praktisch beobachteten gleiche Kerbempfindlichkeit auch in einfachen Kerbzugversuchen an kleinen runden Stäben erreicht werden kann [6]. Jedoch müssen die Versuchsproben über 20 mm Durchmesser haben und in der Querrichtung geschmiedeter oder gewalzter Stangen entnommen werden, damit die Laboratoriumsversuche zu gleichartigen zahlenmäßigen Ergebnissen wie das Prüfen der Schmiedestücke führen.

Diese hochfesten Stähle leiden zusätzlich noch in hohem Maße, falls durch Beizen oder Plattieren Wasserstoff in den Stahl eingeführt wird [7]. Abb. 3 illustriert einen der vielen Schadensfälle infolge dieser Wasserstoffbrüchigkeit, nämlich den einer Anschlußmutter

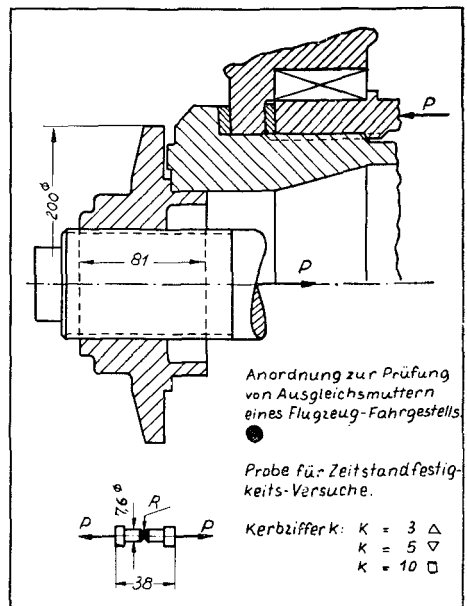
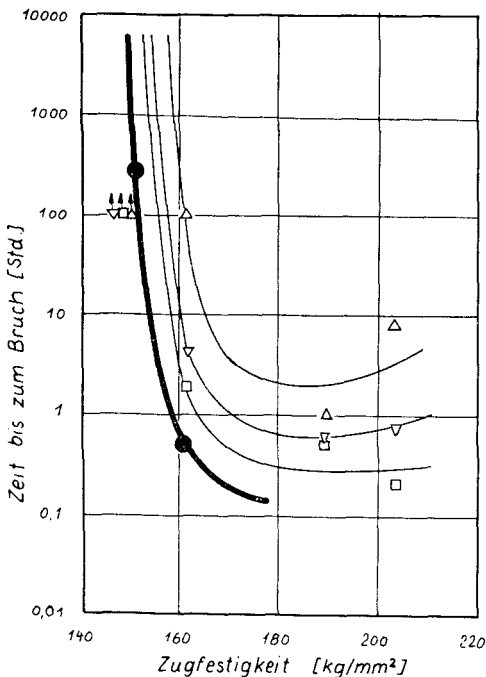


Abb. 4. Einfluß der Zugfestigkeit auf den Bruch von kadmiumplattierten Ausgleichsmuttern und gekerbten Proben mit verschiedenen Spannungskonzentrationen bei einer Belastung von 55–60% der Zugfestigkeit

eines Flugzeugfahrgestells, welche längere Zeit einer Beanspruchung von nahezu 50 Prozent ihrer Festigkeit ausgesetzt war. Großversuche an solchen Muttern im Verband mit anderen Flugzeugteilen ergaben nun entsprechend Abb. 4, daß ein Versagen innerhalb kurzer Zeit zu erwarten war, falls das Schmiedestück auf eine Festigkeit höher als etwa 160 kg mm² vergütet wurde. Wiederum führen Laboratoriumsversuche an gekerbten Stäben zu der gleichen Gesetzmäßigkeit [8].

Erhöhung der Konstruktionsfestigkeit durch Herstellungsmaßnahmen

Werkstoffe, die durch ihre hohe Empfindlichkeit zu besonderen Schwierigkeiten führen, können andererseits vielfach in ihrem Betriebsverhalten nicht nur durch Gestaltungsmaßnahmen, sondern auch durch besondere Herstellungsverfahren verbessert werden. Ein solches Verfahren, das neuerdings weitgehende Beachtung findet, ist das Oberflächendrücken. Braunschweig ist ja die Wiege dieser Entwicklung und die dahingehenden Arbeiten von Prof. O. Föppel haben die Wege zur Verwendung des Oberflächendrückens erschlossen.

Trotz vielversprechender Wirkungen im Laboratorium hat sich jedoch dieses Verfahren nur sehr langsam in der Praxis durchgesetzt. Dafür sind wohl verschiedene Gründe verantwortlich. Unter anderem müssen die genauen Arbeitsbedingungen für jeden Fall besonders ausgearbeitet werden und ihre Anwendung entzieht sich einer verlässlichen Betriebskontrolle. Dies erklärt wohl, daß die meisten Verwendungen des Oberflächendrückens, und besonders des Kugelstrahlens, auf Grund von Betriebsversuchen entwickelt worden sind. Dieser Weg ist naturgemäß kostspielig und unbefriedigend, da er wenig zur wissenschaftlichen Erkenntnis des Problems beiträgt.

Zu den empfindlichen Werkstoffen, für die Oberflächendrücken besonders vielversprechend erscheint, gehören Magnesiumlegierungen [9]. Betriebserfahrungen mit diesem Material haben jedoch vielfach zu Enttäuschungen geführt. Neuere systematische Versuche, welche zur Verbesserung von Magnesiumrädern (Abb. 5) mit diesem Verfahren durchgeführt wurden, lassen darauf schließen, daß dies mit der hohen Empfindlichkeit des Effekts gegen Veränderungen der Arbeitsbedingungen zusammenhängt.

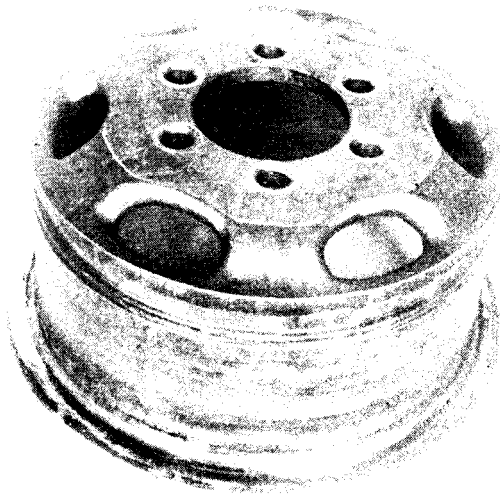


Abb. 5. Magnesiumrad nach einem Laufversuch mit Riß in der Flanschkeile

In diesen Versuchen wurde entsprechend Abb. 6 zunächst die Spannungsverteilung im Rade während simulierter Betriebsversuche festgestellt [10]. Brüche treten dort ein, wo die Spannung am höchsten ist, nämlich in der Abrundung zum Flansch. Die normale Ermüdungsfestigkeit gegossener und auch geschmiedeter Magnesiumlegierungen ist unter solchen Bedingungen nicht ausreichend, um mit Stahlblech in Konkurrenz zu treten.

Um den möglichen Erfolg des Oberflächenrollens festzustellen, wurden dann Ermüdungsversuche an den in Abb. 7 illustrierten Probestäben durchgeführt,

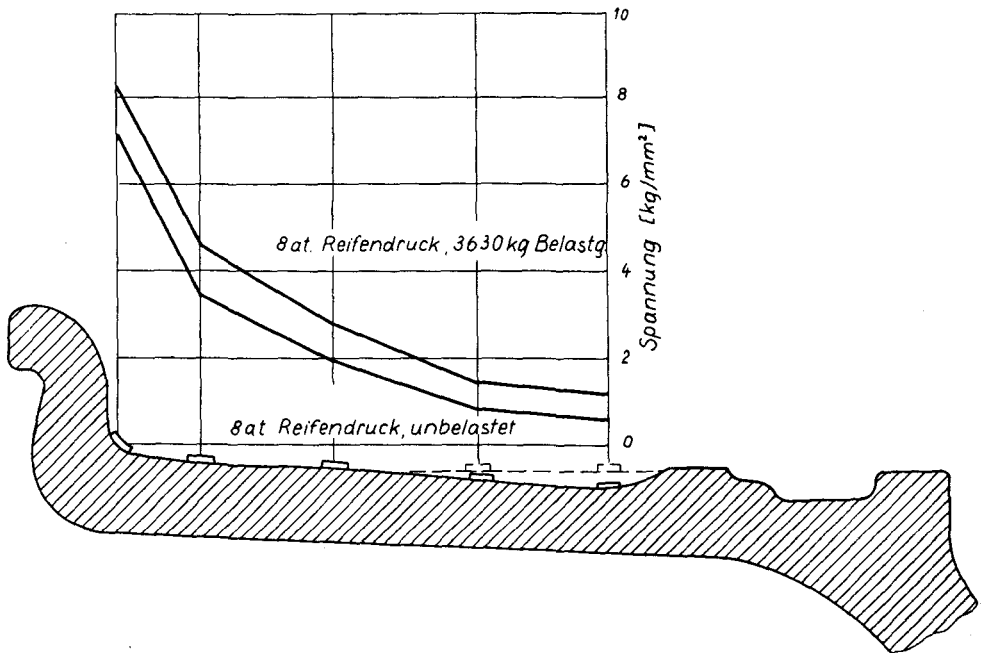


Abb. 6. Spannungen in der Felgenoberfläche eines 20'' x 1,5'' Magnesiumrades

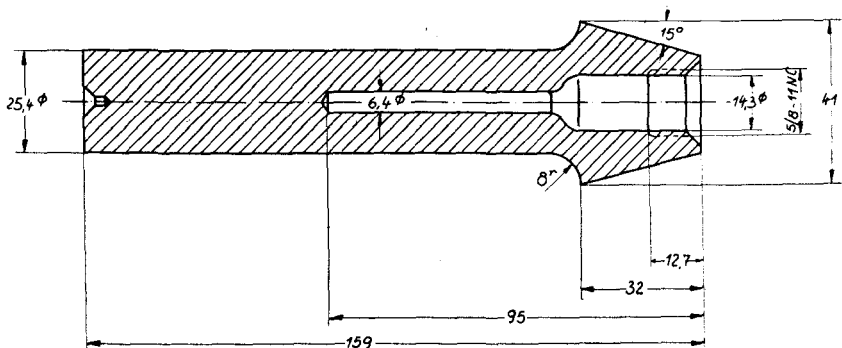


Abb. 7. Ermüdungsprobe für Magnesiumlegierungen

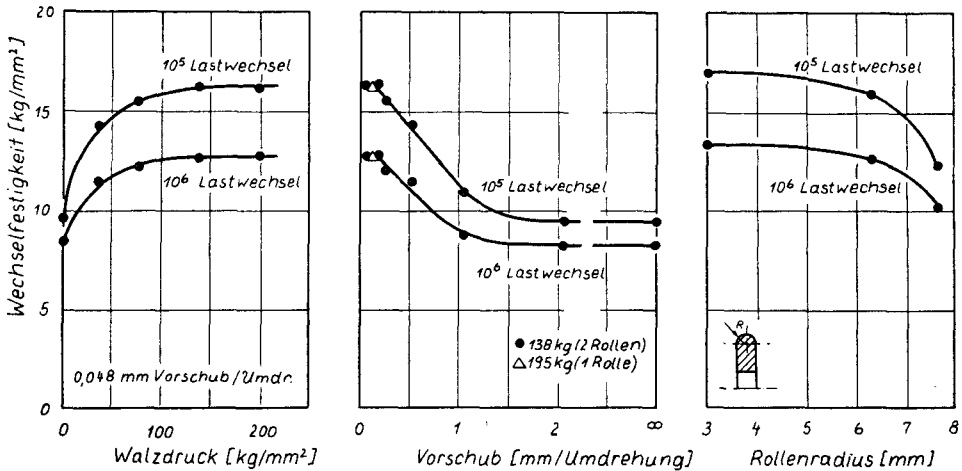


Abb. 8. Einfluß des Walzdrucks, des Vorschubs und des Rollenradius auf die Wechselfestigkeit oberflächen-gewalzter Magnesiumproben (AZ 81 A—T 4)

welche den praktischen Gestalts- und Belastungsbedingungen nahekamen. Diese ergaben die außerordentlich starken, in Abb. 8 veranschaulichten Wirkungen von verschiedenen Veränderlichen, z. B. des Anpreßdrucks, des Vorschubs und des Rollenradius.

Die Anwendung der danach als günstig erkannten Arbeitsbedingungen führte dazu, daß ein Betriebsversuch an einem derartig behandelten Rad nach 4 Millionen Umdrehungen wegen anderer Schäden abgebrochen werden mußte, während ein unbehandeltes Rad nach etwa 300 000 Umdrehungen brach. Die Lebensdauer von konkurrenzfähigen Stahlblechrädern war etwa 3 Millionen Umdrehungen.

Auswahl von Werkstoffen für einen bestimmten Anwendungszweck

Noch vor kurzer Zeit war es in der Regel möglich, eine bestimmte Konstruktion nach einem einzigen Gesichtspunkt zu entwerfen, und zwar ruhende Teile in bezug auf statische Festigkeit oder bewegte Teile in bezug auf Ermüdungsfestigkeit. Diese einfache Sachlage trifft heute nur noch selten zu. Es ist daher im allgemeinen notwendig geworden, verschiedenartige Beanspruchungen zu berücksichtigen. Falls der Entwurf schon feststeht, muß dann der Werkstoff nach dem Gesichtspunkt ausgewählt werden, daß er gegenüber den verschiedenen Beanspruchungen ein Optimum darstellt.

Ein derartiges Beispiel ist die Lebensdauer von Schaufeln in Düsenmotoren. Diese ist entweder durch die statische Festigkeit bei hohen Temperaturen (Zeitstandfestigkeit) oder durch die Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffes bestimmt. Das Kriechen des Werkstoffes unter konstanter Belastung und der dadurch bedingte Dauerstandbruch erscheinen wichtiger als der Ermüdungsbruch unter wechselnder Belastung. Der Dauerstandbruch ist einer systematischen Analyse zugänglich, während diese anscheinend für Ermüdung noch

nicht gelungen ist [11]. Es ergibt sich daher die Aufgabe, den Werkstoff mit dem höchsten Widerstand gegen Kriechen zu finden, ohne daß damit die Gefahr eines frühzeitigen Ermüdungsbruches verbunden ist.

Die Fliehkraftspannungen und die Temperaturen in den Schaufeln können teils durch Rechnung, teils durch Großversuche bestimmt werden. Sie sind in

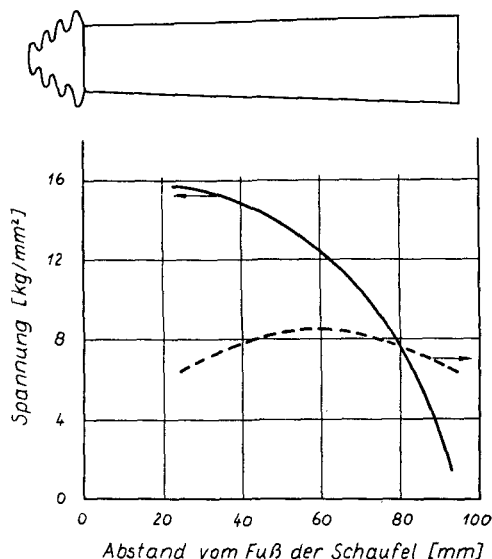


Abb. 9. Spannungsverteilung infolge der Zentrifugalkraft und Temperaturverteilung längs des Blattes einer Turbinenschaufel

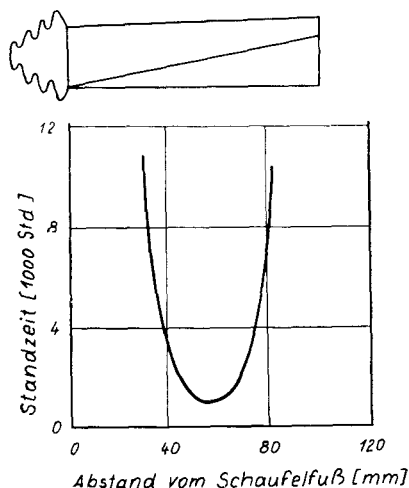


Abb. 10. Berechnete Lebensdauer verschiedener Zonen einer Turbinenschaufel

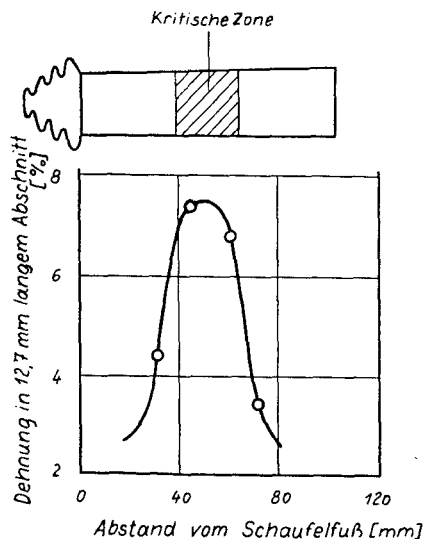


Abb. 11. Kriechdehnung einer S 816-Turbinenschaufel nach 395 Betriebsstunden (Spannung in der kritischen Zone 14,5 kg/mm² bei 820° C)

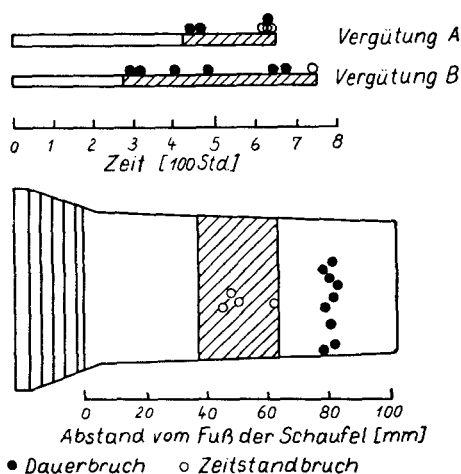


Abb. 12. Bruchart, Lebensdauer und Bruchstelle für Turbinenschaufeln aus einer Nickel-Legierung, die zwei verschiedenen Wärmebehandlungen unterworfen wurde

Abb. 9 für eine bestimmte Anordnung schematisch wiedergegeben. Die dadurch bedingte Lebensdauer der Schaufelelemente kann dann entsprechend Abb. 10 für einen bestimmten Werkstoff auf der Basis von Laboratoriumsversuchen berechnet und ein kritischer Bruchbereich festgelegt werden. Messungen der Kriechverformung, die in Abb. 11 wiedergegeben sind, und Beobachtungen über die Lage von Dauerstandbrüchen in Abb. 12 bestätigen solche Rechnungen. Jedoch zeigen solche Versuche auch, daß Ermüdungsbrüche außerhalb der für Kriechen kritischen Zone auftreten können, und fernerhin daß solche Brüche auf gewisse Werkstoffe beschränkt sind.

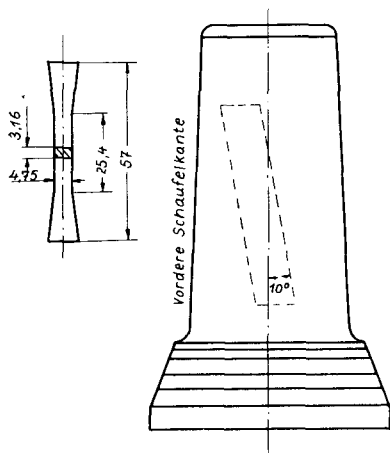


Abb. 13. Aus einem Schaufelblatt herausgeschnittene Probe für Zeitstandversuche

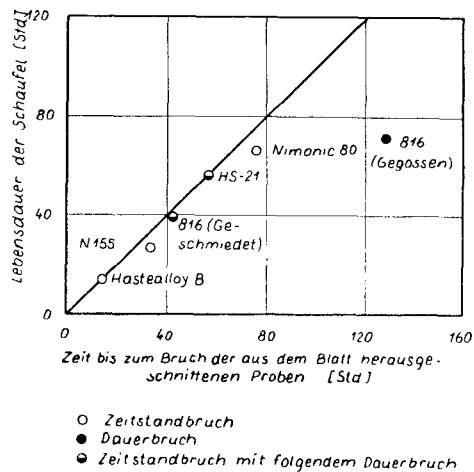


Abb. 14. Beziehung zwischen Lebensdauer von Schaufeln und Dauerstandproben aus verschiedenen Legierungen

Weitere Versuche erstreckten sich auf die Beziehung zwischen der Lebensdauer von Schaufeln in einem Düsenmotor und der von Laboratoriumsproben, die aus gleichartigen Schaufeln entnommen waren (Abb. 13) im Dauerstandversuch. Das Ergebnis dieser Versuche in Abb. 14 veranschaulicht, daß die Lebensdauer der Versuchsproben die gleiche ist wie die von Schaufeln, falls Ermüdung überhaupt nicht eintritt oder erst gegen Ende der Lebensdauer der Schaufeln. Echte Ermüdungsbrüche dagegen kennzeichnen ein frühzeitiges Versagen, wie zum Beispiel Legierung 816 (gegossen) in Abb. 14.

Modellversuche für Konstruktionszwecke

Das Festigkeitsverhalten von kompliziert gestalteten Konstruktionen kann im allgemeinen nur annäherungsweise vorausberechnet werden. Ihre endgültige Gestaltung muß daher in der Regel auf Grund von ausgedehnten Betriebsversuchen entwickelt werden [12]. Dieser Prozeß ist außerordentlich langwierig und kostspielig, falls es sich um besonders hochentwickelte Apparaturen, wie z. B. die Schalen-Konstruktionen für Atomreaktoren, handelt. Ihre Entwicklung wird besonders auch durch hohe Betriebstemperaturen erschwert.

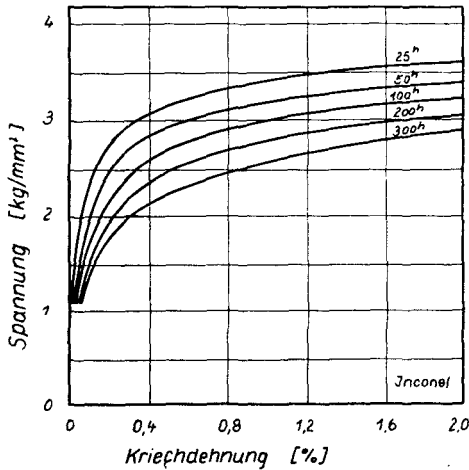


Abb. 15. Kriechkurven bei einer Versuchstemperatur von 810° C für Inconel

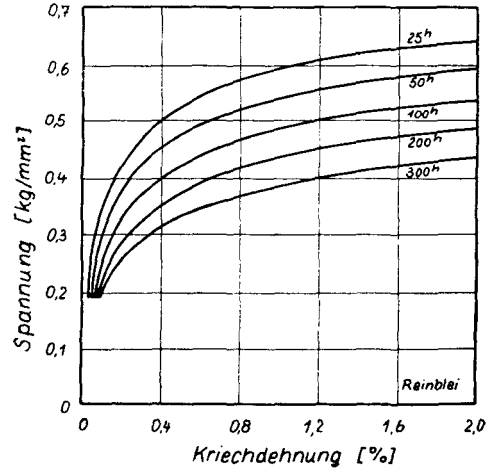


Abb. 16. Kriechkurven bei einer Versuchstemperatur von 38° C für Reinblei

Es erscheint jedoch möglich, die Lösung solcher Probleme mit Hilfe von Modellversuchen erheblich zu beschleunigen. So besitzt z. B. nach Abb. 15 ein hochschmelzender Werkstoff, wie die 14 % Cr und 6 % Fe enthaltende Nickellegierung Inconel bei etwa 800°C, Kriechkurven, die denen von Reinblei bei etwa 40°C in Abb. 16 sehr ähnlich sind, falls die Spannungen im Verhältnis 6 zu 1 stehen. Die für Berechnungen nötigen „isochronen“ Kurven, welche die Spannungen darstellen, die zu bestimmten Dehnungen innerhalb bestimmter Zeiten führen, haben daher auch die gleiche Gestalt für Inconel bei 800°C, Abb. 17, wie für Blei bei 40°C, Abb. 18, wobei wieder die Spannungen im Verhältnis 6 zu 1 gleiche Dehnungen in gleichen Zeiten für die beiden Werkstoffe liefern.

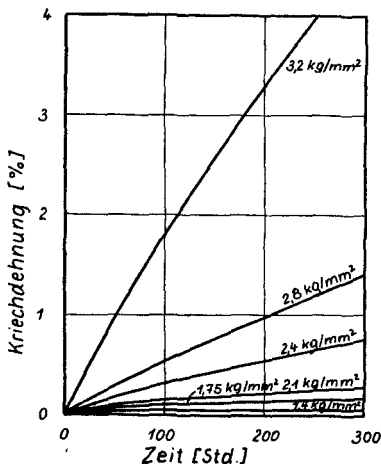


Abb. 17. Isochrone Spannungs-Dehnungskurven von Inconel bei einer Versuchstemperatur von 810° C

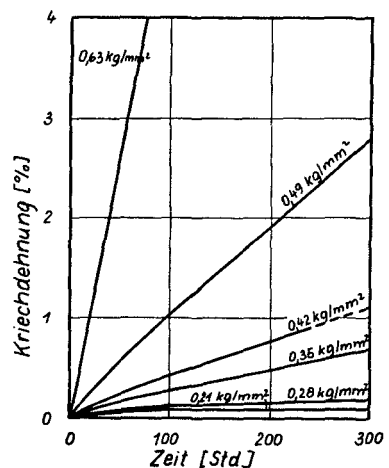


Abb. 18. Isochrone Spannungs-Dehnungskurven von Reinblei bei einer Versuchstemperatur von 38° C

Auf dieser Grundlage können dann Modellversuche an Bleischalen ausgeführt und ihre Ergebnisse auf Inconel übertragen werden. Solche Versuche sind zur Zeit im Gange und ihre Ergebnisse erscheinen vielversprechend. Sie beziehen sich sowohl auf das Kriechen von Schalelementen unter innerem Druck als auch auf den „Durchschlag“ der Schale unter äußerem Druck. Jedoch hat es sich ergeben, daß Experimentieren mit dünnen Bleischalen wegen ihrer Weichheit schwierig ist und zu stark streuenden Versuchsergebnissen führt. Es ist daher beabsichtigt, in weiteren Untersuchungen Werkstoffe, wie Aluminium, Kupfer und Silber, die etwas höhere Temperaturen für Modellversuche erfordern, zu verwenden.

Zum Abschluß meines Vortrages möchte ich nur noch erwähnen, daß Modellversuche an Blei sich auch für die Entwicklung der Schmiedebedingungen für hochschmelzende Werkstoffe bewährt haben. Sowohl Titanlegierungen, als auch Nickel- und Kobaltlegierungen erfordern hohe Schmiededrucke. Da diese Werkstoffe sehr teuer sind, werden Verfahren, die mit einem Minimum von Butzengewicht arbeiten, besonders interessant. Falls das Butzengewicht gering ist, ist nicht nur die Schmiedekraft, sondern auch der spezifische Schmiededruck niedriger, der sowohl für das Fließen des Werkstoffes, als auch für die Standzeit des Werkzeuges entscheidend ist. Versuche an Blei haben gezeigt, daß die Fließgesetze für dieses Metall oft grundsätzlich die gleichen wie für hochschmelzende Werkstoffe sind.

Literatur

- [1] *Sachs, G.*, et al., Survey of low-alloy aircraft steels heat-treated to high strength levels, Wright Air Development Center, Techn. Rep. 53—254 (1954).
- [2] *Sachs, G.*, Survey of low-alloy aircraft steels heat-treated to high strength levels Part 2: Fatigue, Wright Air Development Center, Tech. Rep. 53—254, Pt. 2 (1954)
- [3] *Sachs, G.*, und *Klier, E. P.*, Survey of low-alloy aircraft steels heat-treated to high strength levels, Part. 5: Mechanical properties in the presence of stress concentrations, Wright Air Development Center, Tech. Rep. 53—254, Pt 5 (1954).
- [4] *Ripling, E.*, Notch sensitivity of steels. Paper from: Symposium on effect of temperature on the brittle behavior of metals with particular reference to low temperatures, American Society of Testing Materials, Spec. Tech. Publ. No. 158 (1955) p. 365.
- [5] *Hoffman, O.*, Effects of stress concentration, fibering and residual stresses, Proceedings 1955 Sagamore Ordnance Materials Research Conference (1956).
- [6] *Murdi, B.*, *Sachs, G.*, und *Klier, E.*, Design properties of high-strength steels in the presence of stress concentrations, Wright Air Development Center, Tech. Rep. 56—395 (1956).
- [7] *Sachs, G.*, und *Beck, W.*, Survey of low-alloy aircraft steels heat-treated to high strength levels, Part 1: Hydrogen embrittlement, Wright Air Development Center, Tech. Rep. 53—254, Pt 1 (1953).
- [8] *Klier, E.*, *Murdi, B.*, und *Sachs, G.*, Design properties of high-strength steels in the presence of stress-concentrations and hydrogen embrittlement, Wright Air Development Center, Tech. Rep. 55—18 (1954—1955).
- [9] *Sachs, G.*, Improving Aircraft Propellers by Surface Rolling, Metals Alloys, Vol. 10 (1939) p. 19.
- [10] *Atkin, R.*, und *Mezoff, J.*, Development and testing of magnesium alloy wheels, Proceedings Third Sagamore Ordnance Materials Research Conference (1957).
- [11] *Ault, J.*, und *Weeton, G.*, Bucket failure mechanism and problems in correlation of laboratory data with gas-turbine bucket performance, Proceedings Third Sagamore Ordnance Materials Research Conference (1957).
- [12] *Bigelow, C.*, Prediction of Creep buckling of thin symmetrical shells from tensile creep test data, Proceedings Third Sagamore Ordnance Materials Research Conference (1957).